

摩 擦 切 断 に 関 す る 研 究

古村義彰* 豊島敏雄*

Experimental Study on Friction Cutting

Yoshiaki KOMURA, Toshio TESHIMA

(Received Dec. 17, 1979)

Friction cutting has a convenient characteristic that is negligible small wear of a friction wheel, but is used not frequently than the circular saw method or the abrasive wheel method for cutting, and the reports about the friction cutting are few. Therefore, in order to obtain information concerning the characteristics of friction cutting, experimental studies have been carried out, and the results obtained are as follows.

- 1) In friction cutting of a steel sheet, friction speed about 40m/s and contact pressure larger than 0.6kg/mm^2 are suitable cutting conditions.
- 2) The cut-off speed and friction force are smaller for more easily oxidized material among ferrous metals used in the experiments.
- 3) The cut-off speed under oxygen jet increases twenty times as large as that in the air.
- 4) The characteristics of friction cutting are little influenced by the nature of friction wheel materials.
- 5) When the contact pressure in the abrasive wheel method is one tenth of that in friction cutting, the cut-off speed in the abrasive wheel method is almost equal to that in friction cutting, but the cutting force ratio in the abrasive wheel method is considerably larger than the friction coefficient in friction cutting.

1 緒 言

摩擦の技術には二面があり、その一面は軸受などのように摩擦摩耗を小さくしようとする場合であり、もう一面は逆に大きい摩擦摩耗を積極的に利用しようとする場合であり、摩擦溶接、摩擦切

* 機械工学科

断さらには車両の車輪と軌道およびブレーキ片との摩擦などは後者に相当する。摩擦切断は大出力の原動機を必要とし、音響が強烈である、切断面近傍に熱の影響が残り寸法精度が良くないなどの欠点があり、特殊用途以外にはあまり実用されず、その研究も少ない。^{1)~3)}しかし焼入鋼のように高速度鋼丸のこでは切断しにくいようなかたさの高い材料でも短時間で切断でき、工具としての円板の摩耗は丸のこや切断砥石の消耗に比べるとはるかに少なく、長所を生かせばかなり利用価値の高い切断法と思われる。そこで主として鋼板を被切断材として、摩擦切断の諸特性を実験的に明らかにし、摩擦切断利用の指針を得んとした。

2 摩擦切断の原理

摩擦切断は高速高荷重下の摩擦摩耗現象を利用するものである。高速高荷重下の激しい摩擦条件下では接触面のせん光温度のみでなく、摩擦面平均温度もかなり上昇する。摩擦切断では工具の円板外周長さに対して被切断材の接触長さがはるかに小さく、円板は一回転して次の接触位置にくるまでに空气中に放熱して、その摩擦面温度は低くなるが、被切断材は連続的に摩擦されて、その摩擦面平均温度は高く赤熱状態になっている。そのため高温軟化している被切断材の摩擦面表層は、円板摩擦面上の凝着物とつ部によって容易にアブレシブ摩耗的に摩耗し、火花を飛ばしながら急速に切断される。また被切断材摩擦面の軟化層は粘度の高い潤滑剤に近い働きをするため、摩擦切断中の摩擦は境界摩擦的性格を示す。すなわち摩擦切断では非常に比摩耗量が大きいにもかかわらず、摩擦係数はかなり小さい。このような高速高荷重下の摩擦摩耗の一般的諸特性については、別報^{4)~8)}で実験的、理論的に明らかにした。

3 実験装置および方法

実験装置は既報^{4),5)}のものを使用したもので、ここでは簡単に述べることにする。すなわち直径約410 mm、厚さ4.0 mmに旋削仕上した炭素鋼S35C円板に、板状試片を銼により一定荷重で押しつけて摩擦切断し、そのときの摩擦力をひずみゲージで検出し、切込み量は差動変圧器で検出し、それぞれ電気的にペン書き記録計によって記録させた。円板材料としては上記の炭素鋼のほかに銅円板を使用し、被切断材としては主として厚さ9 mmの炭素鋼S35C、ステンレス鋼SUS27(304)、鋳鉄FC20を使用した。それらの材料の化学成分およびかたさを表1に示す。さらにふん囲気の影響を調べるために、摩擦部分を容器内に設定した別の実験装置⁷⁾を用い、その場合に使用したふん囲気気体を表2に示す。

実験条件の範囲

は、おおよそ摩擦速度21.5～107.3 m/s、見かけの接触圧力0.05～1.2kg

／mm²である。また切断溝幅は4 mmであり、接触面積はそれを変えた実験の場合以外は4×9 mm²一定である。

表1 試験材料のかたさと化学成分

試験片	かたさ Hv	化 学 成 分 %						
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
S35C	184	0.34	0.22	0.85	0.027	0.037		
SUS27(304)	153	0.066	0.87	1.15	0.018	0.012	8.77	19.18
FC20	236	3.39	2.83	0.31	0.216	0.048		

表2 ふん囲気気体

気 体	純度 %	水蒸気濃度 ppm
O ₂	99.9	30
N ₂	99.9	40

4 実験結果および考察

4・1 空气中炭素鋼円板の場合の基本特性

4・1・1 接触圧力の影響

図1は炭素鋼S35Cを摩擦切断したときの線摩耗速度と接触圧力の関係を示す。ここで線摩耗速度とは単位時間に9mm厚さの板をどれだけ切り込めるかを示すもので、切断能率に関連した値である。実験結果は線摩耗速度の低い群（低荷重域）とそれより約2けた高い群（高荷重域）に分かれており、前者は主として Fe_3O_4 を生ずるmild wearに、後者は主として FeO を生ずるsevere wearに相当し、摩擦切断は当然後者の高荷重域で行われる。この条件では図2に示すように、砥石切断の場合と同様にはげしく火花を飛ばし、かなり速い線摩耗速度で切断が進行する。

図3は切断抵抗と接触圧力の関係を示す。ここで切断抵抗とは、円板外周に接線方向に働く摩擦力で、切断の所要動力に関連した値である。全般的に切断抵抗は接触圧力に比例的に増大し、摩擦速度が高いほど小さい。図中接触圧力の小さい範囲で測定点が直線からはずれて低下しているが、この範囲は図1で述べたmild wear域に相当している。

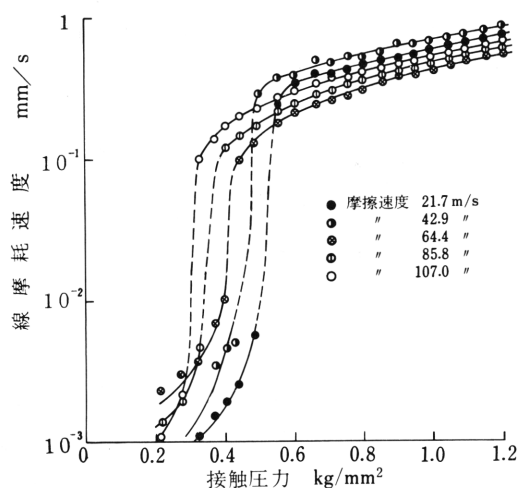


図1 線摩耗速度と接触圧力の関係

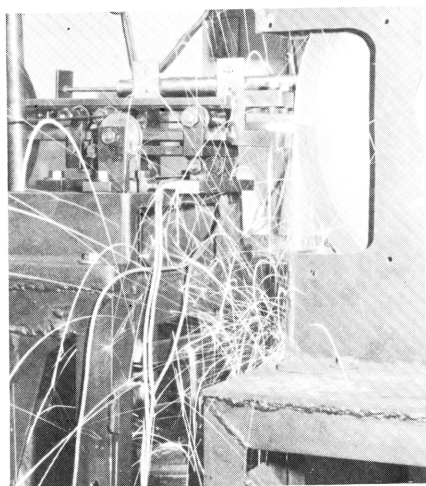


図2 摩擦切断中の状況

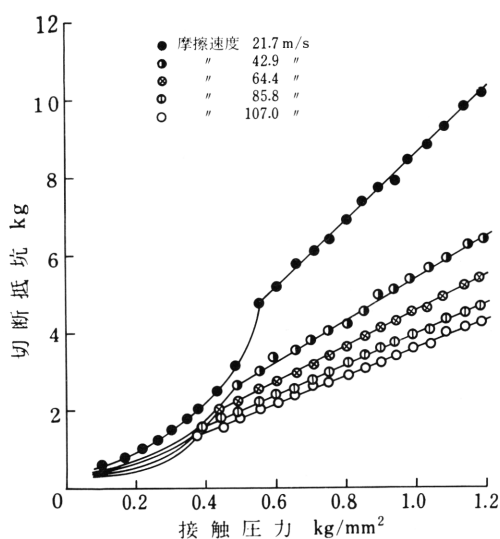


図3 切断抵抗と接触圧力の関係

4・1・2 摩擦速度の影響

図4は高荷重域の代表として、接触圧力 0.8 kg/mm^2 の場合の線摩耗速度と摩擦速度の関係を示す。図から摩擦速度約40 m/sに線摩耗速度の極大値がみられる。図のような傾向は、図1からわかるように高荷重域では接触圧力が変わっても同様である。図5は切断抵抗と摩擦速度の関係を示す。摩

擦速度の上昇とともに、始め急に、後ゆるやかに切断抵抗は低下する。なお参考のために、摩擦切断には利用できないが、低荷重域の代表として接触圧力 0.1 kg/mm^2 の場合も示した。

切断機設計の難しさおよび危険性を考慮すると、摩擦速度は 100 m/s 程度が限度であろうと思われる。したがって図1～図5の結果を総合すると、摩擦速度 40 m/s 付近で、接触圧力 0.6 kg/mm^2 以上が摩擦切断の適当な条件であるといえる。

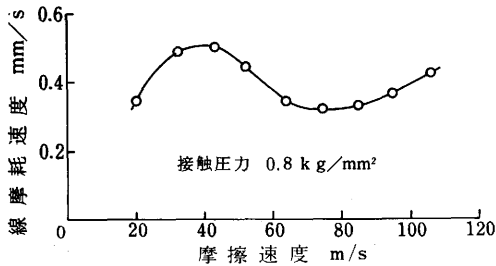


図4 線摩耗速度と摩擦速度の関係

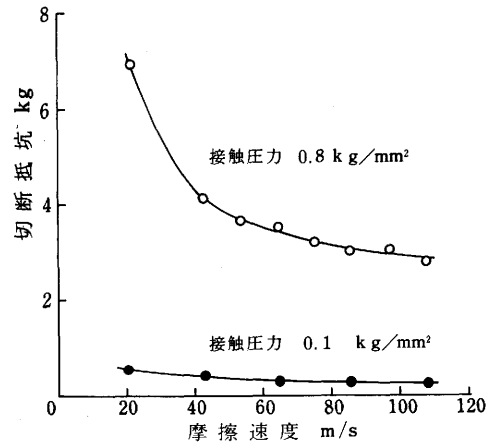


図5 切断抵抗と摩擦速度の関係

4・1・3 接触面積の影響

図6は板厚を変えた場合の接触面積による影響を示す。たて軸として比摩耗量をとっているが、これは単位押付け荷重当り、単位摩擦距離当りの摩耗体積を示す値である。この場合接触圧力は 1.0 kg/mm^2 一定であるから、比摩耗量が一定の場合には接触面積に比例して切り取り体積は増大するが、切込み速度すなわち線摩耗速度は一定である。図からわかるように、摩擦速度 21.7 m/s の場合には比摩耗量は接触面積の増加によってあまり低下しないが、 42.9 m/s 以上の摩擦速度では急激に低下している。図7は図6に対応した摩擦係数を示す。摩擦速度 21.7 m/s の場合には接触面積の増加につれて摩擦係数は低下している。 42.9 m/s 以上では摩擦係数は接触面積によってあまり変わらず、全体的にかなり低い値になっている。

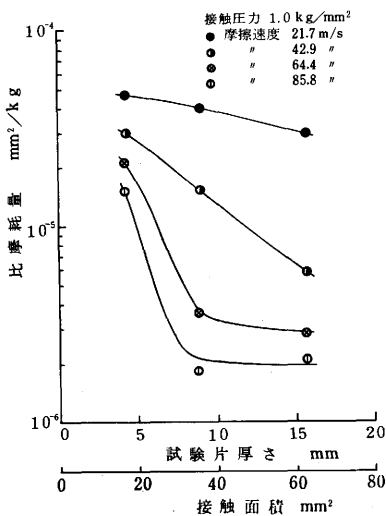


図6 接触面積の影響(比摩耗量)

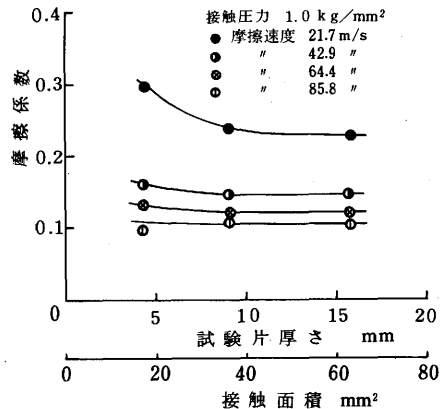


図7 接触面積の影響(摩擦係数)

図6, 図7を合せてみた場合, 高速においては接触面積の増加にほぼ比例して切断抵抗は増大しているが, 切込み速度は逆に急激に低下してほぼ1/10に減少している。それは, 被切断材摩擦面表層の軟化部分が潤滑剤として働き, 摩擦面接触長さの増加とともに負荷能力を急激に増大させるためである。そのため板厚が大きくなると切込み速度が急激に低下する。

4・2 円板外周のおうとつの影響

前述のように, 板厚が増大すると切込み速度が急激に低下する。一般に軸受面積を分割すると, そのための負荷面積の減少よりもはるかに大きい負荷能力の低下をもたらすので, 油溝を切るときは注意しなければならないと言われている。このことを逆に利用して, 円板外周におうとつをつけることによって, 板厚が大きくなった場合の切込み速度の低下を避けることができると考えられる。ここではおうとつの効果を明らかにするため, 円板外周をピッチ円としてモジュール1, 圧力角 14.5° のホブで歯切りした円板を製作し摩擦切断を行い, 単純な円板と比較した。おうとつをもった円板のとつ部, おう部はともに円周長さが $\pi/2$ mmである。図8に示すように, 高荷重域では接触圧力が同じ場合におうとつのある円板のほうが線摩耗速度は大きい。しかし低荷重域の mild wear から高荷重域の severe wear に変わる臨界圧力は, おうとつのある円板の場合のほうが高くなっている。それは, おうとつのある円板の場合には被切断材摩擦面が空気にふれる機会が多く, 高荷重まで摩擦面温度が比較的低温, 酸化膜 Fe_3O_4 の減摩作用が有効に働くためである。以上は接触圧力による比較であるが, 実際の切断作業において同じ押付け力で比較するために, 同じ圧力に対しておうとつのある円板では半分の押付け力で済むことを考慮して, 横軸方向を半分の値に●印の測定点を左へ移動させると破線のようにになる。図からわかるように, 同一押付け力で比較するとおうとつのある円板のほうがはるかに線摩耗速度すなわち切込み速度が大きくなる。図8は板厚9 mmの試験片を用いた比較であるが, 上述の結果から円板の外周におうとつを設けることによって, 被切断材の板厚がかなり大きくなっても切込み速度の低下を避けることができると考えられる。

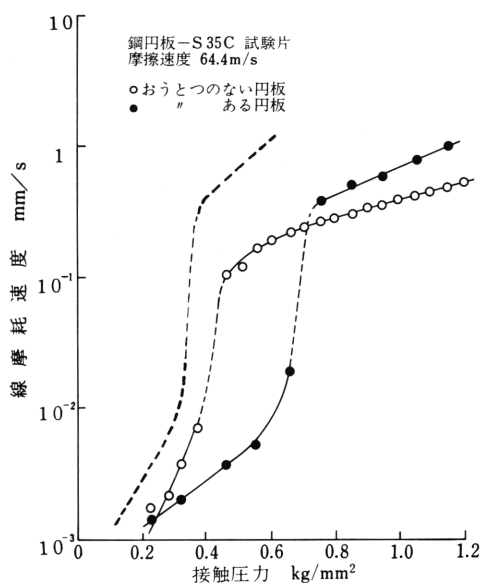


図8 おうとつの影響(線摩耗速度)

図9は試験後のおうとつ円板の外周の外観図である。とつ部先端側の溝にはかなり多くの付着物が見られる。したがっておうとつ円板を長期に使用すると, おう部は付着物



図9 試験後のおうとつ円板摩擦面

でうまり, おうとつの効果はなくなってくると思われる。そのため円板外周にとくにおうとつを設けても実用上あまり有利とは言えない。

4・3 被切断材料の影響

図10, 図11は鉄系材料すなわち炭素鋼 S35C, 鋳鉄 FC20 およびステンレス鋼 SUS27 (304) の比較を示す。これらの図からわかるように, 上記の順に酸化されにくい材料ほど線摩耗速度および切断抵抗は大きい。しかし切断抵抗の差は比較的小さいので, 同一切断動力当たりの切込み速度

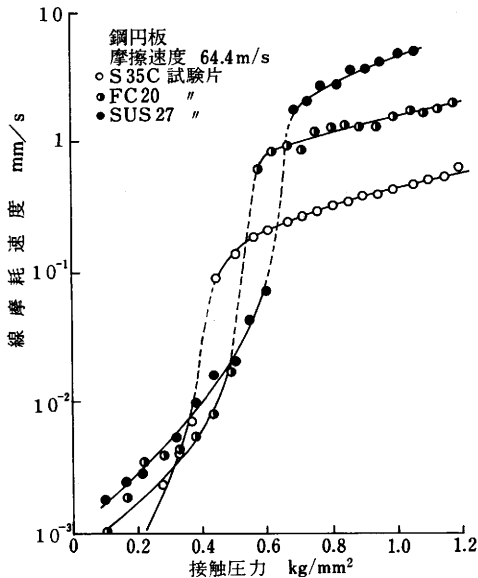


図10 被切断材料の比較 (線摩耗速度)

は炭素鋼よりもステンレス鋼のほうが大きい。しかしステンレス鋼の場合, 摩擦円板外周に不連続的に付着した凝着物が選択的に厚く成長するので, 切断中振動をとれないがちになり, 丸のこによる切断の場合と同様にステンレス鋼は扱いにくい材料と言える。

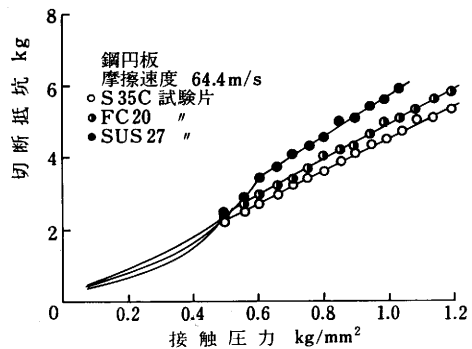


図11 被切断材料の比較 (切断抵抗)

4・4 摩擦円板材料の影響

被切断材料として銅板を用いた場合には, ステンレス鋼の場合よりもさらに凝着がはげしく, 振動のため切断実験を継続することができなかった。⁴⁾ ところで, 摩擦円板の平均温度は実測によると 200℃以下であり, 被切断材の摩擦面平均温度よりはるかに低い。したがって摩擦円板材料としての性質の中で, 室温におけるかたさ値の小さいことはあまり問題にならないはずである。それよりも被切断材との親和性 (凝着しやすさ) や熱伝導率のほうが摩擦切断において重要な影響因子であろうと思われる。それで摩擦円板材料として銅を用い, 炭素鋼 S35C の切断実験を試みた。

図12, 図13はそれぞれ線摩耗速度および切断抵抗と接触圧力の関係を示す。線摩耗速度および切断抵抗はそれぞれ図1, 図3の炭素鋼円板-炭素鋼試験片の組合せの場合の結果と同様の傾向および同様の値を示している。すなわち摩擦円板材料を炭素鋼から銅に変えてもほとんど

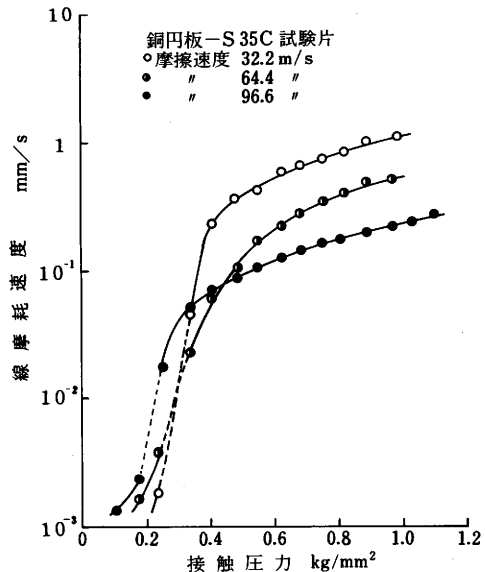


図12 銅円板の場合 (線摩耗速度)

影響がないと言える。さらに被切断材側が銅の場合には著しい凝着と振動をともなうため実験が継続できなかったことを述べた。それらの違いは摩擦面温度を考慮して説明できる。円板摩擦面に対して被切断材の摩擦面ははるかに小さく、連続的に摩擦されるので、被切断材側摩擦面の平均温度が一方的に上昇し、その軟化層でせん断されて円板摩擦面に凝着する。そのため銅円板-炭素鋼試験片の組合せでは、被切断材の炭素鋼が主として FeO の状態で銅円板にはく状に凝着する。一実験例ではその凝着面積は円板摩擦面の約40%であった。この部分は円板の地の面より高く、実際にはこの凝着物で摩擦さ

れ、摩擦円板の銅面が被切断材の鋼と直接接する機会は少ない。そのため銅円板を用いても、炭素鋼円板を用いた場合と同様に、被切断材炭素鋼とその凝着物との間の摩擦現象となり、上述のように円板材料を変えたことによる影響が現われないのである。さらに、このことから摩擦円板側の摩耗量はほとんど問題にならないと言える。したがって円板材料としては、廉価で手軽に得られる炭素鋼で十分であり、銅とか丸のこの場合のような刃物鋼を使用する必要はない。

4・5 ふん囲気の影響

炭素鋼の摩擦切断では、主として融点の低い FeO が生成し、それが減摩作用を果し、線摩耗速度はかなり大きいにもかかわらず切断抵抗は小さい。また既述のように、実験に使用した鉄系材料の中では、酸化されやすさの順（SUS27(304)→FC20→S35C）に線摩耗速度および切断抵抗は小さくなる。したがって炭素鋼の摩擦切断では、ふん囲気の影響はかなり大きいと思われる。

図14、図15は摩擦円板および被切断材ともに炭素鋼S35Cの場合のふん囲気の影響を示す。窒素中では空气中より線摩耗速度はかなり大きい、切断抵抗も大きい。したがってふん囲気として窒素ガスを使用することは実用上あまり有効とは言えない。酸素中では空气中に対して約20倍の線摩耗速度になっているにもかかわらず、切断抵抗は空气中とほとんど変わらない。したがって酸素の使用は実用上有効と思われる。このふん囲気の実験では密封容器内で行っているが、それは実用上は不便であり、実際には切断点近傍に酸素を噴射する方法をとることになる。

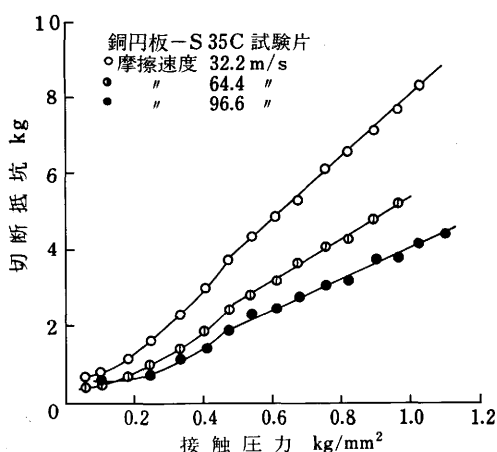


図13 銅円板の場合（切断抵抗）

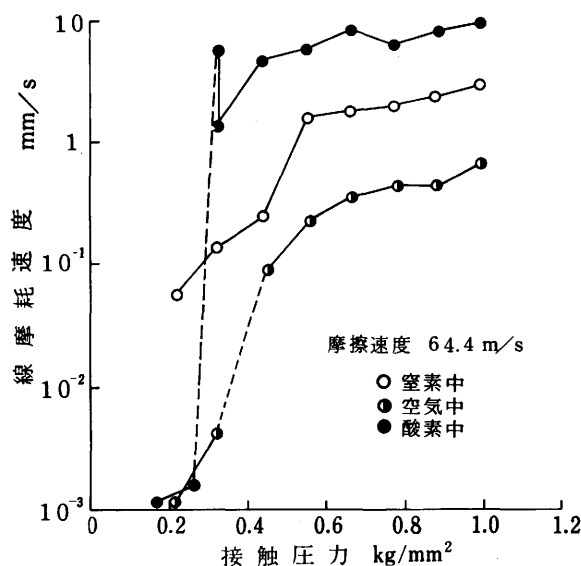


図14 ふん囲気の影響（線摩耗速度）

酸素中で線摩耗速度がとくに大きいのは、摩擦切断にガス切断の作用が加わったいわゆる複合加工になっているためである。摩擦切断の初期に被切断材摩擦面が赤熱状態になると、酸素による燃焼的酸化のための発熱も加わり、被切断材摩擦面表層に生成する流動状の FeO は容易に摩擦円板によってかきとられ、そのため上述のように線摩耗速度はかなり大きいにもかかわらず切断抵抗はほとんど空气中と同様に小さいのである。

4・6 砥石切断との比較

砥石切断との比較のため、摩擦円板取付部に外径約 405 mm，厚さ 3 mm，材質 A36PB（ガラス繊維補強レジノイド結合剤）の切断砥石を取付けて実験した。その結果を図16，図17に示す。この実験では研削状態と厳しい摩擦状態を比較するため、砥石が目つまりしやすいように被切断材厚さ（研削方向接触長さ）を 50 mm と大きくしている。見かけの接触圧力は全体的に摩擦切断の場合の約 1/10 程度である。図16において摩擦（研削）速度が 20.2～50.4 m/s の範囲では、接触圧力とともに線摩耗速度は増加し、その大きさは摩擦切断の場合の高荷重域における値と同程度である。61.0 m/s では約 0.07 kg/mm² の接触圧力から目つまりのため急激に線摩耗速度が低下し、鋼円板摩擦の場合の低荷重域と同程度の接触圧力において、その数倍程度の線摩耗速度になっている。実際の砥石切断では見かけの接触圧力をかなり大きくするので、この速度は適当な研削速度を超えていると言える。佐藤らの研究⁹⁾ではこのような目つまりにより切れなくなる速度を臨界砥石周速と称し、他の条件にもよるがほぼ 50

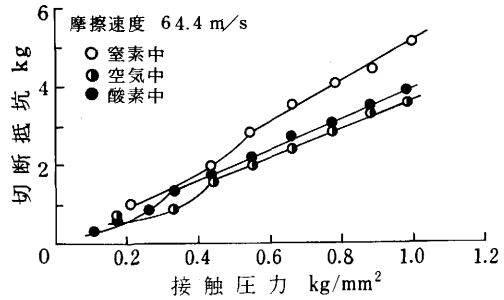


図15 ふん囲気の影響（切断抵抗）

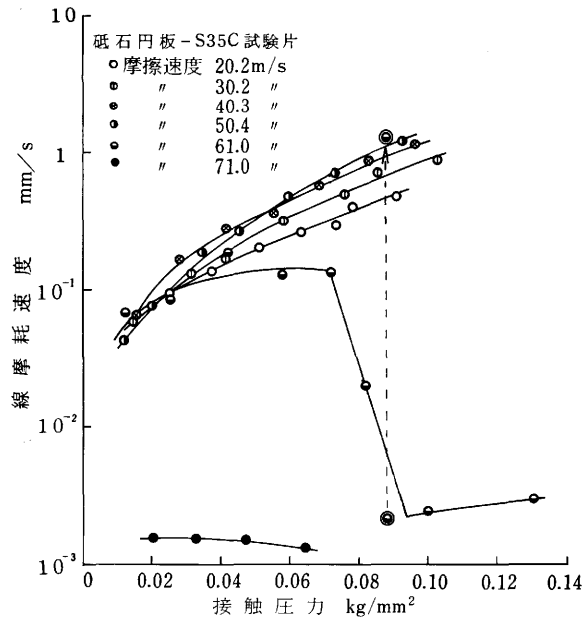


図16 砥石切断における線摩耗速度

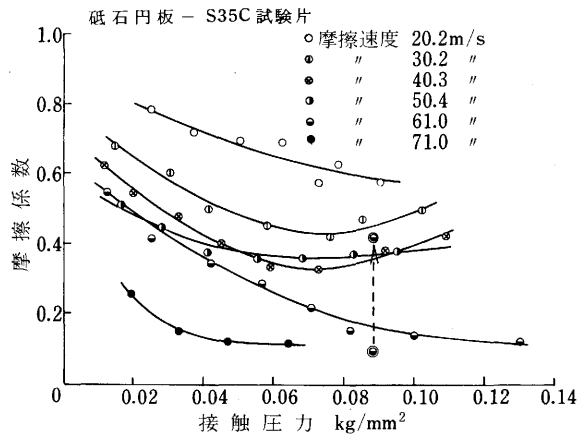


図17 砥石切断における摩擦係数（研削抵抗比）

～60 m/s としており，本実験結果とほぼ一致している。このように線摩耗速度が小さくなる条件における試験後の砥石表面は，かなりの部分が砥石表面より高い凝着物で覆われ，その凝着物が主として被切断材と摩擦している状態になっている。そのため被切断材表層の金属組織の流れも鋼円板摩擦の場合と同様にかかなり深いところまで生じている。なお図中上側の◎は下側の◎の状態を実験中に砥石表面で大きい脱落が起り，切れ味が一時的に急に良くなったことを示している。また 71.0 m/s では実験範囲で正常な研削状態は全くみられなかった。

図17は研削抵抗の背分力と接線分力の比を摩擦試験の場合と同様に摩擦係数として示したものである。線摩耗速度が小さい場合（目つまり状態）の摩擦係数はだいたい 0.2 以下の小さい値で，鋼円板摩擦の場合と同程度であり，機構的にも同じ状態であろう。しかし線摩耗速度の大きい場合（正常研削状態）の摩擦係数はかなり大きく，約 0.8 の値もみられる。摩擦切断の場合には，かなり大きい線摩耗速度を示し，摩擦すじも大きく，外見上の性格はアブレンシブ摩耗的であるが，摩擦係数はかなり小さい。すなわち摩擦切断を，砥石切断を摩耗現象とみた研削摩耗，アブレンシブ摩耗と比較すると明らかに異なっている。このような両者の違いは研削面と摩擦面の温度の違いによるものと考えられる。すなわち摩擦切断では高温軟化し流動状態に近い摩擦面表層を低せん断抵抗でぬぐい取るように排除し，それに反して砥石切断では比較的低温の研削面を微小切削によって削りとり，そのため線摩耗速度は両者同程度でありながら，摩擦係数では両者にかかなり大きい差がみられるのである。

5 結 言

以上の研究結果を結論としてまとめると次のとおりである。

- 1) 炭素鋼 S35C 摩擦切断では，摩擦速度 40 m/s 程度で，接触圧力 0.6 kg/mm^2 以上が適当な作業条件である。
- 2) 鉄系材料の中では，ステンレス鋼のように酸化されにくい材料ほど線摩耗速度および切断抵抗は大きくなる。また凝着が著しく，振動をとめないがちになる。
- 3) 切断点近傍に酸素を噴射すると，空気中の約 20 倍に切断能率は向上するが，切断抵抗はあまり変わらない。
- 4) 摩擦円板材料としては廉価な炭素鋼で十分であり，銅（軟かいが熱伝導率大きい）や刃物鋼（かたさが大きい）をとくに使用する必要はない。
- 5) 被切断材が厚い場合，おうとつをもった摩擦円板によって線摩耗速度の低下を避けることができるが，切断作業の続行によってしだいにおう部はうめられるので，あまり実用的ではない。
- 6) 砥石切断では約 $1/10$ の接触圧力で，摩擦切断と同程度の線摩耗速度が得られ，切断能率はよいが切断抵抗はかなり大きい。
- 7) 摩擦切断では摩擦円板の摩耗をほとんど考えなくてよい有利さがある。

参 考 文 献

- 1) 切削加工技術便覧編集委員会；切削加工技術便覧，（1968），1124，日刊工業。
- 2) 小川正義・歌川正博；日本機械学会誌，56，415（1953－6），622。
- 3) J.M.Lewis and G.H.Sheppard；Tool Engineers Handbook, 66-13,67-7, McGraw-Hill.

- 4) 豊島敏雄・古村義彰：潤滑，20， 2 (1975)， 83.
- 5) Toshis. TESHIMA・Yoshiaki KOMURA：Memoirs Fac.Eng.Fukui Univ., 27, 1(1979), 77.
- 6) 豊島敏雄・古村義彰：潤滑，21， 10 (1976)， 709.
- 7) 古村義彰・豊島敏雄：潤滑，24， 4 (1979)， 245.
- 8) 古村義彰・豊島敏雄：潤滑，24， 5 (1979)， 312.
- 9) 佐藤耕吉・山本富才・木村康之：精機学会北陸信越支部長野地方講演会前刷集 (1974)，297.